



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 100 20 708 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**H 01 F 7/20**  
H 01 F 13/00

②① Aktenzeichen: 100 20 708.1  
②② Anmeldetag: 27. 4. 2000  
④③ Offenlegungstag: 8. 11. 2001

19270 U.S. PTO  
10/764753



012604

DE 100 20 708 A 1

⑦① Anmelder:  
Beerwald, Hans, Dr., 44135 Dortmund, DE

⑦② Erfinder:  
gleich Anmelder

⑤⑤ Entgegenhaltungen:  
DE 44 36 615 A1  
DE 43 35 935 A1  
US 49 33 657  
US 31 24 726

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Mehrwindungsspule zur Erzeugung starker Magnetfeldimpulse

⑤⑦ Mehrwindungsspulen, die mit Aramidfaser armiert sind, werden mit metallischen Einlagen in der Armierung ausgestattet. Diese metallischen Einlagen dienen in erster Linie zur Wärmeabfuhr. Die so gekühlten Mehrwindungsspulen sind als Werkzeug für die industrielle impuls-magnetische Umformung im 10-Sekunden-Takt geeignet. Darüber hinaus können die Metalleinlagen als Stützgehäuse gestaltet werden, so daß auch Arbeitsspulen mit nicht kreisförmigem Querschnitt realisiert werden können. Solche Stützgehäuse lassen sich auch mit einer zerlegbaren metallischen Anordnung armieren.

DE 100 20 708 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft eine armierte Mehrwindungsspule zur Erzeugung starker Magnetfeldimpulse oberhalb von 15 Tesla, wie sie in der OS DE 43 35 935 A1 beschrieben ist. Diese Mehrwindungsspulen sind meist einlagige Zylinderspulen aus einem mit Glasseide umsponnenem rechteckigen Kupferdraht, dessen Querschnitt wenige Quadratmillimeter beträgt. Mit einem kurzen Stromstoß von wenigen 10 µs Dauer wird ein magnetisches Feld mit einem Spitzenwert der Flußdichte im Bereich von 15 bis 25 Tesla erzeugt. Durch einen einzelnen Stromstoß erwärmt sich die Spule wegen der kurzen Dauer nur um wenige Kelvin. Der magnetische Druck in der Spule erreicht einen hohen Wert, z. B. 250 MPa bei 20 T, weshalb die Spule mit einem Panzer armiert werden muß.

[0002] Solche Magnetfeldspulen werden eingesetzt bei der impuls magnetischen Umformung von elektrisch gut leitfähigen Metallen, insbesondere zum Fügen von Aluminium- oder Kupferrohren auf Metall-, Keramik- oder Kunststoffkerne.

[0003] Die Armierung solcher Magnetfeldspulen besteht gewöhnlich aus einem Faserverbundwerkstoff, der nicht elektrisch leitfähig sein darf. Besonders bewährt hat sich die Para-Aramid-Faser (Kevlar), die eine extrem hohe Zugfestigkeit besitzt. Wegen der hohen Stoßbelastung ist ihre schwingungsdämpfende Eigenschaft ein besonderer Vorteil. Sie besitzt jedoch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit.

[0004] Beim Einsatz der Magnetfeldspulen in industriellen Fertigungsprozessen mit kurzen Taktzeiten akkumuliert sich die pro Impuls erzeugte geringe Erwärmung, so daß eine Kühlung der Spule notwendig ist. Kapillarrohr als Spulendraht, durch das eine Kühlflüssigkeit geführt werden könnte, scheidet wegen der starken Druckstöße aus. Bisher wurde die in der Spule entstandene Wärme an der Innenfläche der Spule, an der sich nur eine dünne Isolierschicht befindet, abgeführt. Die Kühlung durch einen Luftstrom in den Taktphasen ist meist nicht ausreichend. Ein Kühlkanal an der Innenfläche der Spule erhöht die Spaltbreite zwischen Werkstück und Spule, die mit magnetischer Energie gefüllt werden muß und eine Erhöhung der Energie der Impulsstromanlage erfordert. Ebenso führt eine kühlbare Metalleinlage im Inneren der Spule zu zusätzlichen Verlusten, bedingt durch starke Wirbelströme und zusätzliche Spalte, die mit magnetischer Energie gefüllt werden müssen, wie es von Feldformern bekannt ist.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Kühlung der armierten Spule zu realisieren, die nicht eine Erhöhung der in der Stoßstromanlage gespeicherten Energie, die schließlich zusätzlich als Wärme abgeführt werden müßte, erfordert.

[0006] Diese Aufgabe wird erfindungsmäßig dadurch gelöst, daß in oder unter die Armierung eine die Wärme ableitende Metalleinlage eingefügt ist, wobei diese Metalleinlage so ausgebildet ist, daß Ringströme in ihr vermieden werden.

[0007] Im Bereich außerhalb der Spule, wo sich die Armierung befindet, ist die magnetische Feldstärke vernachlässigbar gering verglichen mit der Feldstärke im Spuleninneren. Deshalb existiert außerhalb der Spule nur ein praktisch wirbelfreies elektrisches Ringfeld. Der Ringstrom in der Metalleinlage kann z. B. dadurch unterbunden werden, indem man ein Metallrohr mit mindestens einem Längsschlitz als Metalleinlage in der Armierung verwendet, entsprechend Patentanspruch 2.

[0008] Die Erfindung nutzt die Wirbelfreiheit des induzierten elektrischen Feldes außerhalb der Spule, wobei dieser Bereich als wirbelfrei bezeichnet wird, da die Rotation des elektrischen Feldvektors hier praktisch null ist im Vergleich zum Bereich innerhalb der Spule.

[0009] Die Einlage aus hochfestem Metall erleichtert die Armierung von Spulen mit nicht kreisförmigem Querschnitt. So läßt sich z. B. eine Spule zur Kompression eines Rechteckrohres mit Hilfe eines längsgeschlitzten Hohlprofils armieren, dessen innere Kontur an die Rechteckspule angepaßt ist und die äußere Kontur kreisförmig ist, entsprechend Patentanspruch 4. Als Material für derartige Hohlprofile ist z. B. CuCrZr, AlMgCu 1,5 oder auch Edelstahl geeignet.

[0010] Dickwandige Metalleinlagen kann man mit Kühlkanälen versehen. Dünnwandige längsgeschlitzte Rohre läßt man an mindestens einem Spulenende herausragen und kühlt sie dort mit einem Luftstrom oder einer Flüssigkeit.

[0011] Die Erfindung ermöglicht die Anwendung von Mehrwindungsspulen als Werkzeug bei der Massenfertigung von Fügeverbindungen mittels der impuls magnetischen Umformung. Mehrwindungsspulen ermöglichen eine optimale Anpassung an den Impuls generator. Bei zu niedriger Windungszahl, wie es meistens bei Einwindungsspulen der Fall ist, wird der größte Teil der im Impuls generator gespeicherten Energie nutzlos zum Aufbau magnetischer Energie in den Bauteilen des Impuls generators verbraucht. Bei zu hoher Windungszahl wird der Spitzenwert der magnetischen Feldstärke verzögert und die durch Ohmsche Verluste verursachte Dämpfung erniedrigt ihn.

[0012] Fig. 1 veranschaulicht eine Kompressionsspule nach Anspruch 2. Die einlagige Zylinderspule 1 ist aus rechteckigem mit Glasseide umsponnenem Kupferdraht gewickelt. Das die Spule umschließende Kupferrohr 2 mit Längsschlitz 3 ist zur zusätzlichen elektrischen Isolation auf seiner Innenseite mit einer 50 µm dicken Polyimidfolie mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit (Kapton CR50) belegt. Das Kupferrohr 2, soweit es die Spule umschließt, ist mit Para-Aramid-Garn (Kevlar) umwickelt, was im wesentlichen die Armierung 4 bestimmt. An den herausragenden Teil des geschlitzten Kupferrohres wird gewöhnlich eine von Kühlflüssigkeit durchströmte Kupferrohrleitung, die in der Fig. 1 nicht eingezeichnet ist, angelötet. Die beiden Zuleitungen von den Spulenenden zu den Anschlußplatten 5 werden gewöhnlich durch den Schlitz 3 geführt, wofür der Schlitz, falls er nicht breit genug ist, an den Durchführungsstellen verbreitert werden kann. Dieses System aus Kupferwicklung 1, geschlitztem Kupferrohr 2 und Armierung 4 ist mit Epoxidharz getränkt. Zur Vermeidung des Hohlraums im Längsschlitz 3 ist dieser mit einem druckfesten Material gefüllt, z. B. mit einem Streifen aus Hartgewebe. Zwischen den Anschlußplatten 5 befindet sich eine in der Abbildung nicht eingezeichnete 0,3 mm dicke Isolierfolie.

[0013] Experimentelle Untersuchungen an einer Spule mit 15 Windungen aus 5,5 × 1,8 mm hochkant gewickeltem Kupferdraht mit einem inneren Spulendurchmesser von 25 mm und einer Spulenlänge von 34 mm ergaben bei einem Wasserdurchlauf von 0,5 Liter pro Minute und 100 W zugeführter elektrischer Verlustleistung eine Temperaturerhöhung gegenüber der Kühlwassertemperatur von 30 K. Diese Messung wurde an einer leeren Spule mit Impulsen im 10-Sekunden-Takt durchgeführt. Im praktischen Betrieb mit Umformung von Werkstücken bei Annahme von 50% Leistungsverlust in der Spule kann im 10-Sekunden-Takt mit 2 kJ gearbeitet werden. Bei einem Durchmesser des Werkstücks von 24 mm beträgt der Spitzenwert der magnetischen Flußdichte im Spalt zwischen Werkstück und Spule 18 T, was einem magnetischen Druck von über 200 MPa entspricht.

[0014] Fig. 2 zeigt im Querschnitt eine Spule nach Anspruch 4. Sie dient zum Fügen eines nicht scharfkantigen Rechteckrohres. Die Kupferwicklung 6 ist ebenfalls aus glaserumsponnenem Rechteckdraht gewickelt. Das metalli-

sche Hohlprofil 7 besitzt in diesem Fall zwei Längsschlitz 8a, 8b und ist somit zweigeteilt. An der Innenseite und in den Längsschlitz 8a, 8b ist das Hohlprofil 7 ebenfalls mit Kaptonfolie belegt. Das geteilte Hohlprofil 7 ist mit Kevlarm umwickelt, wodurch die beiden Teile des Hohlprofils gegen die Spulenwicklung 6 gedrückt werden. Die Schlitz 8a und 8b sind beim Wickeln des Kevlarm mit Keramikpulver und noch flüssigem Gießharz ausgefüllt; das Kevlarm wird schon beim Wickeln mit Gießharz getränkt. Die getränkte Kevlarwicklung stellt die Armierung 9 dar. Wegen ihrer Dickwandigkeit können die beiden Teile des Hohlprofils jeweils mit einer kleinen Bohrung in Längsrichtung für Flüssigkeitskühlung versehen werden. Neben der Kühlmöglichkeit hat die Metalleinlage unter der Armierung den Vorteil, daß sie wegen ihrer Steifigkeit als starres Stützgehäuse für Mehrwindungsspulen benutzt werden kann und damit auch Mehrwindungsspulen mit nicht kreisförmigem Querschnitt realisiert werden können, wie das Ausführungsbeispiel in Fig. 2 zeigt.

[0015] In dem Ausführungsbeispiel in Fig. 2 ist die Spulenwicklung von einem eng anliegenden metallischen Stützgehäuse umgeben, wobei sich zwischen Spulenwicklung und Stützgehäuse eine druckfeste Isolierschicht befindet und das Stützgehäuse so ausgebildet ist, daß ein Ringstrom in ihm verhindert wird. Es ist also auch ein Ausführungsbeispiel für den Patentanspruch 5. Das Stützgehäuse besteht aus zwei Teilen, die auf sehr einfache Weise durch Umwickeln mit der Faser hoher Zugfestigkeit zusammengepreßt werden.

[0016] Die mit Fasern armierten Spulen zeichnen sich durch kostengünstige Herstellung und ihr geringes Volumen aus. Sie sind aber nicht zerlegbar. Zerlegbarkeit ist für Reparaturen an der Spule und für Versuche mit verschiedenen Spulenwicklungen manchmal erwünscht. Um eine zerlegbare Spule zu realisieren, könnte man das Stützgehäuse nach Patentanspruch 5 mit einer mechanischen Presse ausrüsten. Die Schwierigkeit liegt in einer Konstruktion der Presse, bei der ein induzierter Ringstrom vermieden werden muß. Man könnte eine einarmige Spindelpresse mit C-förmigem Gestell benutzen oder den geschlitzten Metallblock mit isolierten Schrauben zusammenhalten. Besser ist eine doppelständerige Presse, die jedoch wiederum eine Kurzschlußwindung darstellt, in der ein Ringstrom induziert wird. Diesen Ringstrom im Ständerahmen zu unterdrücken ist eine weitere Aufgabe der Erfindung.

[0017] Diese Aufgabe wird erfindungsmäßig dadurch gelöst, daß der induktive Widerstand des Metallrahmens durch Einfügen ferromagnetischen Materials zwischen seinen Schenkeln so erhöht wird, daß der induzierte Ringstrom im Metallrahmen so stark unterdrückt wird, daß er vernachlässigbar klein ist gegenüber dem Spulenstrom.

[0018] Der in Fig. 3 dargestellte Querschnitt veranschaulicht ein Ausführungsbeispiel einer Mehrwindungsspule nach Anspruch 7. Der Metallblock 10, der die Spulenwicklung 11 umschließt, besitzt zwei Schlitz 12a und 12b. Dadurch ist der Metallblock zweigeteilt, was die Montage der Spulenwicklung 11 mit ihren Zuleitungen, die hier nicht gezeichnet sind, sehr erleichtert. Zur Unterdrückung des induzierten Ringstroms im Metallblock 11 wäre nur ein Schlitz notwendig. Die beiden Teile des Metallblocks 11 werden mit dem Stahlrahmen 12 und der Spindel 13 gegen die Spulenwicklung zusammengedrückt. Die Schlitzflächen wie auch die Innenfläche der Bohrung im Metallblock 11 sind mit einer druckfesten isolierenden Folie belegt. Ein Schnittbandkern 14 umschließt die rechte Säule 15b des Stahlrahmens 12. Da die induzierte Umfangsspannung in der Bohrung meist nur einige Hundert Volt beträgt, die in etwa 15 µs abfallen, ist ein Querschnitt des ferromagnetischen Kerns

von 30 cm<sup>2</sup> ausreichend. Falls das Fenster zwischen der Säule 15b und dem Metallblock 11 nicht ausreicht, um einen Schnittbandkern mit genügendem Querschnitt unterzubringen, kann die linke Säule 15a mit einem zweiten Schnittbandkern umschlossen werden.

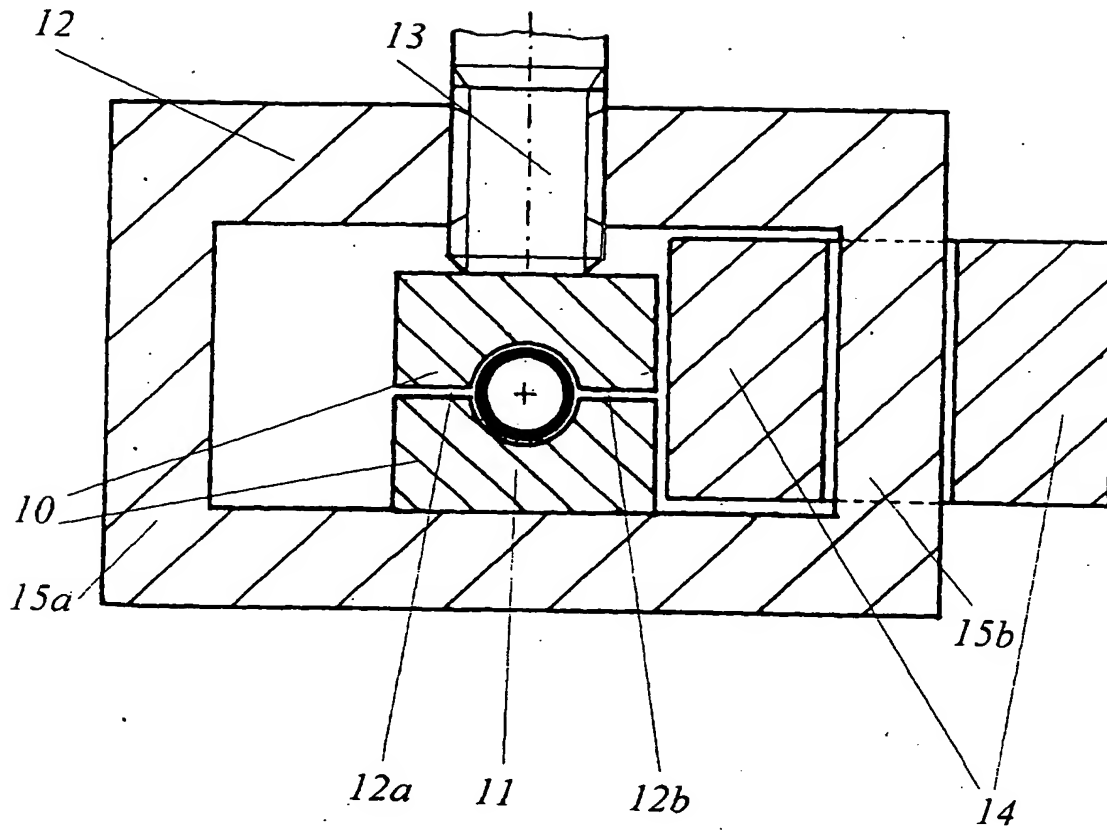
[0019] Der wesentliche Vorteil der Erfindung ist, daß armierte Mehrwindungsspulen gekühlt werden können, so daß sie als Werkzeug in der industriellen Fertigung mit einer Taktzeit von weniger als 10 Sekunden geeignet sind. Die zur Kühlung in die Armierung eingebrachten Metallteile können außerdem als Stützgehäuse für Spulenwicklungen benutzt werden, wodurch der Bau von Mehrwindungsspulen mit nicht kreisförmigem Querschnitt ermöglicht wird. Darüberhinaus ermöglichen die Stützgehäuse auch den Bau von zerlegbaren nur mit Metallteilen armierten Mehrwindungsspulen.

#### Patentansprüche

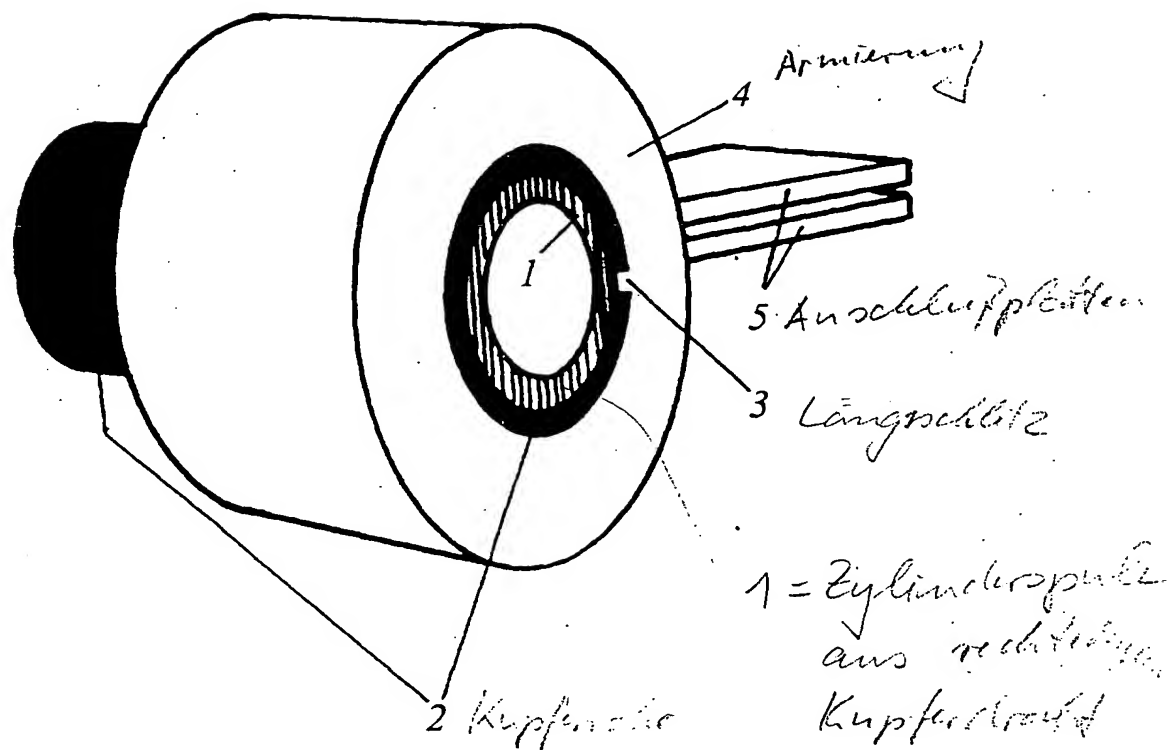
1. Mehrwindungsspule zur Erzeugung starker Magnetfeldimpulse oberhalb von 15 Tesla, die mit einer elektrisch nicht leitenden Faser hoher Zugfestigkeit armiert ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß in oder unter die Armierung eine die Wärme ableitende Metalleinlage eingefügt ist, wobei diese Metalleinlage so ausgebildet ist, daß Ringströme in ihr vermieden werden.
2. Mehrwindungsspule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Metalleinlage als Metallrohr mit mindestens einem Längsschlitz ausgebildet ist, welches die Spule umschließt und mit der Faser hoher Zugfestigkeit umwickelt ist.
3. Mehrwindungsspule nach Anspruch 2 mit nicht kreisförmigem Querschnitt, dadurch gekennzeichnet, daß das längsgeschlitzte Metallrohr ein Hohlprofil ist, dessen Innenmaße an den nicht kreisförmigen Querschnitt der Spule angepaßt sind.
4. Mehrwindungsspule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die äußere Kontur des Hohlprofils kreisförmig ist.
5. Mehrwindungsspule zur Erzeugung starker Magnetfeldimpulse oberhalb von 15 Tesla, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule von einem eng anliegenden metallischen Stützgehäuse umgeben ist, wobei sich zwischen Spule und Stützgehäuse eine druckfeste Isolierschicht befindet und das Stützgehäuse so ausgebildet ist, daß ein Ringstrom in ihm verhindert oder stark unterdrückt wird.
6. Mehrwindungsspule nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Stützgehäuse aus einem Metallblock besteht, der zur Aufnahme der Spulenwicklung eine passende Bohrung enthält und mit mindestens einem Spalt ausgestattet ist zur Vermeidung eines Ringstroms im Metallblock und dieser geschlitzte Metallblock durch isolierte Schrauben oder eine Presse, z. B. eine einarmige Spindelpresse, zusammengehalten wird.
7. Mehrwindungsspule nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Stützgehäuse mit einem geschlossenen Metallrahmen, z. B. einer doppelständerigen Spindelpresse, zusammengepreßt wird, wobei der induktive Widerstand des Metallrahmens durch Einfügen ferromagnetischen Materials mindestens zwischen einem seiner Schenkel so erhöht wird, daß der induzierte Ringstrom im Metallrahmen stark unterdrückt ist.

- Leerseite -

*Fig. 3*



**Fig. 1**



**Fig. 2**

